

Tendo em mãos os comparativos dos resultados obtidos pelo **Prestress** e pelo cálculo independente manual no Capítulo 4, pode-se validar os métodos adotados neste programa. Os exemplos do Capítulo 5 também demonstram o bom comportamento desta metodologia. Ademais, o Capítulo 4 também demonstra a facilidade de uso da ferramenta, permitindo a verificação ao ELS de vigas protendidas por pós-tração aderente de forma simples e, caso necessário, a iteração entre diferentes possíveis soluções.

O **Prestress** implementa um método de cálculo genérico e incremental das perdas progressivas genérico, desenvolvido por Glodowski e Lorenzetti (apud Ramaswamy¹⁴). Para tal, foi necessário modificar as equações preconizadas na NBR 6118,¹ sem perda de precisão ou comportamento. Com essas equações modificadas é então possível aproximar a interação entre as perdas por relaxação do aço e fluência e retração do concreto. Embora a norma brasileira já apresente métodos que levem esta interação em consideração (ver itens 9.6.3.4.2 e 9.6.3.4.3 da NBR 6118¹), estes são válidos apenas sob algumas hipóteses. Já o método incremental não apresenta tais restrições.

A possibilidade de considerar o efeito da protensão da uma viga no restante da estrutura e vice-versa permite que o cálculo fique mais unificado, sem que o usuário tenha que utilizar programas distintos para cada tipo de análise estrutural. Isto permite que o cálculo de vigas protendidas se aproxime da filosofia BIM. Também, conforme visto no exemplo da Seção 5.1, a consideração do possível efeito da estrutura global na protensão (e vice-versa) pode ser essencial para entender o seu real comportamento.

Os demais programas de protensão apresentados na Seção 1.4 foram desenvolvidos por equipes profissionais e a maioria apresenta ferramentas muito mais avançadas do que as presentes no **Prestress**. Este, porém, incorpora-se ao **Robot**, o que permite uma interoperabilidade com os demais produtos da Autodesk (**Revit**, por exemplo). A filosofia BIM não implica no uso exclusivo do pacote de apenas uma empresa. Dito isso, enquanto os padrões abertos (arquivos IFC, por exemplo) e sua implementação não são aperfeiçoados,⁴⁷ a utilização de programas da mesma empresa facilita seguir o conceito BIM.

Deve-se salientar que o **Prestress** sempre deve ser utilizado por um engenheiro familiarizado com os conceitos de protensão e que seja capaz que analisar com um olhar crítico os resultados e reconhecer resultados fora do padrão.

6.1

Sugestões para trabalhos futuros

O **Prestress** ainda tem muito espaço para futuros desenvolvimentos. A seguir será apresentada uma lista de diversas melhorias nos âmbitos de: usabilidade, otimização e novas funcionalidades. Muitos destes itens já foram apresentados na Seção 3.1 como coisas que o **Prestress** *não* faz (ainda).

- **Novas funcionalidades:**

- **Verificação de protensão parcial:** Devido à complexidade dos dados adicionais necessários para o cálculo ao ELS-W, o **Prestress** não permite o cálculo da protensão parcial. Como esta é uma condição permitida pela norma brasileira, esta falha deve ser sanada. Deve-se estudar como implementar este cálculo de modo inteligente;
- **Metodologia de protensão de cada cabo:** No momento o **Prestress** assume que cada cabo será protendido em apenas uma fase, não sendo possível protendê-lo em múltiplas fases. Também não é possível protender um cabo por uma extremidade e então outra. Como tais metodologias de protensão de cabos individuais existe na prática, isto deveria ser permitido pelo programa;
- **Carga equivalente de retração:** O **Prestress** assume para o cálculo da retração que a viga não tem restrição ao deslocamento axial, o que leva a perdas exageradas quando este não é o caso (ex. vigas de pórticos). Se o programa calcular a deformação com esta hipótese, um carregamento de temperatura equivalente pode ser obtido e aplicado ao modelo. A deformação real, considerando as condições de contorno, poderia então ser obtida pelo **Robot** e utilizada no cálculo destas perdas. Se a retração for restringida, a viga sofrerá uma tração permanente que poderá ser incluída na análise de tensões da estrutura;
- **Melhorias no arquivo de resultados:** O arquivo de resultados atual apresenta o que pode ser considerado o essencial: as tensões nos bordos superior e inferior de cada seção, a verificação ao ELS e o alongamento dos cabos. É porém possível apresentar mais resultados para que o usuário possa validar o programa. Os valores obtidos para λ de cada cabo após cada fase poderiam ser apresentados, por exemplo;
- **Consideração da excentricidade do cabo em relação à bainha:** É comum o projeto de concreto protendido considerar que o centroide do cabo é igual ao da bainha, mas esta hipótese é uma

aproximação e é normalmente contra a segurança. No ato da protensão o cabo tenta se retificar e seu centroide se desloca em relação ao da bainha. Nos pontos mínimos, por exemplo, as cordoalhas do cabo acabam acumuladas no topo da bainha e, nos pontos máximos, no fundo da bainha.^{11,19} A excentricidade da força de protensão ao centroide da seção de concreto é então diferente da calculada pelo método tradicional. O **Prestress** poderia tentar considerar este erro;

- **Verificação de construtibilidade:** Será mais simples implementar esta função após a melhoria da definição do traçado dos cabos (ver abaixo). Tendo os dados das curvas é possível verificar questões como raios de curvatura e cobrimentos mínimos;
- **Interface com o Revit:** A escolha do **Robot** como plataforma do **Prestress** ocorreu devido aos passos da Autodesk para consolidar seus programas e se aproximar à filosofia BIM. Um próximo passo para o **Prestress** seria dividir o programa em dois: a entrada de dados seria feita no **Revit** e o cálculo no **Robot**. Os cabos de protensão seriam então modelados dentro do **Revit**, permitindo mais verificações de construtibilidade e interferências, inclusive se é possível locar macacos hidráulicos nas posições das ancoragens;
- **Excentricidade horizontal:** Cabos excêntricos ao eixo vertical da seção da viga geram momentos fletores ao redor do eixo fraco. Para considerar este efeito o traçado do cabo deve ser definido em três dimensões, o que seria mais plausível no **Revit**. Esta função teria então que ocorrer após a interface com esta plataforma;
- **Demais normas internacionais:** O cálculo do **Prestress** é hoje fundamentado na NBR 6118¹ mas não há porque não implementar demais normas internacionais;
- **Dimensionamento:** A sugestão mais ousada da lista, o dimensionamento automatizado e genérico de vigas protendidas é um projeto (muito) complexo. Uma possibilidade seria adotar um carregamento distribuído qualquer, obter seu diagrama de momentos fletores e adequá-lo ao traçado de um cabo teórico. Isto implicaria em possíveis hiperestáticos mínimos. Obtendo os momentos ao longo do vão e calculando de forma aproximada as perdas em cada ponto seria possível definir a força de protensão necessária. Este “chute” do programa teria que então ser verificado pelo método tradicional. Se não for satisfatório, o traçado teria que ser ajustado e então verificado

novamente até obter uma solução (ou o programa desistir). É evidente que a solução obtida pelo programa não seria necessariamente a melhor. Uma questão seria como considerar a possível necessidade de cabos intermediários (que se ancoram em pontos que não sejam as extremidades da viga);

- **Usabilidade:**

- **Edição de vigas:** No momento o **Prestress** não permite que o usuário edite a protensão de uma viga. Caso uma viga seja calculada pelo programa e o usuário queira alterar alguma propriedade da protensão, toda a entrada de dados terá que ser refeita. O código foi desenvolvido de tal forma a facilitar a implementação desta funcionalidade;
- **Melhoria na definição do traçado dos cabos:** O método atual de definição dos traçados é ineficiente na maioria dos casos. O usuário deve definir a cota do cabo em cada seção, o que é trabalhoso e apresenta mais oportunidades para erros e imprecisões. A definição deveria ser mais inteligente e ocorrer através de pontos-chave: as posições das ancoragens e dos pontos máximos e mínimos; e o tipo de traçado utilizado entre cada dois pontos: reta ou parabólica. No caso de parábolas, o programa deveria otimizar o traçado para que as parábolas de curvatura negativa (onde os demais momentos solicitantes são negativos) sejam tão apertadas quanto for possível, o que requer conhecimento do raio de curvatura mínimo permitido, conforme o item 18.6.1.2 da NBR 6118.¹ O programa também poderia considerar automaticamente a influência do trecho reto perto das ancoragens, conforme o item 18.6.1.5 da mesma norma. A Figura 6.1 apresenta um possível exemplo de como deveria ser: o usuário define as coordenadas chave (representados por pontos cheios) e o programa calcula os pontos de interesse intermediários (representados por pontos vazios), tal como os pontos de inflexão das parábolas, em função dos poucos dados apresentados. Para casos excepcionais o método tradicional também estaria disponível;

- **Otimização:**

- **Múltiplas vigas:** O **Prestress** no momento permite o cálculo de apenas uma viga. Seria mais eficiente se o usuário pudesse definir a protensão de diversas vigas ao mesmo tempo, seja a protensão de cada viga igual ou diferente. O cálculo das perdas e das cargas equivalentes teria que ser feita para cada viga individual, logo não

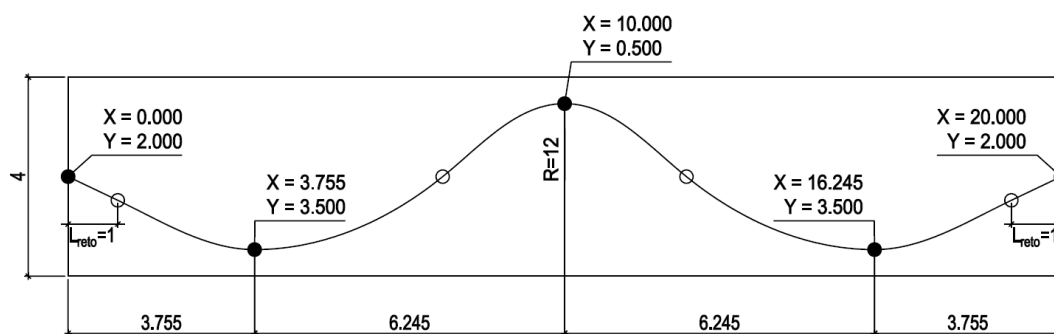


Figura 6.1: Melhoria na definição do traçado de um cabo. O usuário entra as coordenadas das ancoragens e dos pontos máximos e mínimos (apresentadas como pontos cheios) e outros dados (raio de curvatura mínimo das parábolas e comprimento do trecho reto nas ancoragens) e o programa calcula as demais coordenadas críticas (apresentadas como pontos vazios), como os pontos de inflexão das parábolas.

haveria ganho de eficiência neste passo. A otimização, no entanto, ocorreria nos recálculos do modelo no **Robot** após cada fase. Cada vez que o **Robot** soluciona um modelo, este inicia com a criação da matriz de rigidez. Se o **Prestress** for feito para uma viga e então para outra, ambas com quatro fases de vida, o custo da matriz de rigidez ocorre $2 \times 4 = 8$ vezes. Se as vigas forem calculadas de forma simultânea, no entanto, a matriz é gerada apenas quatro vezes. Os cálculos também seriam mais precisos, uma vez que a protensão de uma viga pode afetar as tensões de outra. Caso haja múltiplas vigas com a mesma protensão também há o ganho de produtividade do engenheiro, que não precisaria definir cada viga individualmente;

- **Eliminar cálculo de carregamentos desnecessários:** O **Robot** permite “desligar” carregamentos para que estes não sejam calculados. Como o modelo deve ser calculado múltiplas vezes cada vez que o **Prestress** roda, reduzir o número total de carregamentos a calcular pode otimizar o programa. Os carregamentos móveis (como o TB-45 da NBR 7188⁴¹), cada qual geram dezenas de sub-casos, por exemplo, são de fato necessários para o **Prestress** apenas no final para a verificação em serviço, mas são calculados sem necessidade repetidas vezes. Infelizmente, embora estes sejam os carregamentos que mais acelerariam o programa ao serem desligados, um erro do **Robot** muitas vezes impede que o tempo de cálculo seja reduzido.⁴⁸